



Desenvolupament de microgeneradors inercials electromagnètics en tecnologia de micro sistemes per a la recuperació d'energia mecànica residual de l'ambient

Núria Fondevilla Sala

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tdx.cat) i a través del Dipòsit Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX ni al Dipòsit Digital de la UB. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX o al Dipòsit Digital de la UB (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tdx.cat) y a través del Repositorio Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR o al Repositorio Digital de la UB. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR o al Repositorio Digital de la UB (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tdx.cat) service and by the UB Digital Repository (diposit.ub.edu) has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized nor its spreading and availability from a site foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository is not authorized (framing). Those rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.



UNIVERSITAT DE BARCELONA

Facultat de Física

Departament d'Electrònica

DESENVOLUPAMENT DE
MICROGENERADORS INERCIALS ELECTROMAGNÈTICS
EN TECNOLOGIA DE MICROSISTEMES PER A LA RECUPERACIÓ
D'ENERGIA MECÀNICA RESIDUAL DE L'AMBIENT

Núria Fondevilla Sala

Director tesis:

Dr.Christophe Serre

Barcelona, Maig 2012

CONCLUSIONS

L'objectiu d'aquesta tesi consisteix en l'anàlisi del potencial de la tecnologia de Si per extreure energia mecànica residual de l'ambient. Aquesta mena de font "perpètua" d'energia seria especialment adequada per alimentar sensors abandonats. Dels diferents tipus de generadors inercials els electromagnètics podrien ser els més adients perquè presenten un bon acoblament electromecànic i són senzills, malgrat generar voltatges baixos.

El microgenerador inercial electromagnètic escollit per a la fabricació és de tipus ressonant degut a què obtenint densitats de potències equivalents a la dels híbrids, presenten dissenys més senzills, facilitant-ne la miniaturització. No obstant, requereixen d'una freqüència de vibració ben definida, com la proporcionada per un motor. El seu funcionament permet aprofitar amplituds de moviment molt petites que s'amplifiquen quan la freqüència de ressonància del ressonador està dissenyada per coincidir amb la proporcionada per l'excitació.

El disseny del dispositiu escollit consta d'una bobina fixa en el marc de la membrana, per facilitar-ne les connexions elèctriques, i un imant mòbil a sobre la membrana ressonant, que també realitzarà la funció de massa inercial. Aquest disseny seria l'adequat, tant a nivell de robustesa com en les possibilitats de miniaturitzar-lo per ser integrat en tecnologia MEMS.

L'estudi de les causes de la disminució dràstica de la densitat de potència amb la miniaturització dels generadors inercials electromagnètics indica que són degudes a la disminució de la massa magnètica i a l'augment de la resistència elèctrica al reduir les mides. Malgrat tot, per a algunes dimensions, les bobines microfabricades podrien presentar un millor funcionament que les convencionals degut a les limitacions en el diàmetre mínim del fil. Una altra restricció a tenir present és l'esmoreïment paràsit descrit pel factor de qualitat. Mentre que els generadors inercials vibracionals d'escala macromètrica assoleixen les condicions d'esmoreïment òptim quan l'electromagnètic iguala al paràsit, en el cas dels microdispositius l'esmoreïment electromagnètic és molt menor per la reducció en l'acoblament electromagnètic.

Les simulacions per elements finits (ANSYS) del model del dispositiu basat en el seu principi de funcionament han permès analitzar per una banda la influència de la geometria i materials del ressonador i per altra banda, els paràmetres geomètrics i del material conductor de la microbobina en la tensió i la potència generades. Segons les simulacions de les freqüències de ressonància en funció dels diferents paràmetres del ressonador, el més crític és la mida de la membrana, limitada per la mida del dispositiu, seguit del seu gruix que en condiciona la integritat. A nivell de disseny s'han realitzat diferents geometries per buscar una que no presenti un primer mode de torsió i a la vegada permeti el pas d'un flux d'aire. Totes aquestes configuracions, malgrat millorar el pas de l'aire, presenten una tendència a un moviment de torsió de l'imat. Per tant, s'ha optat per dissenyar un ressonador format per una membrana polimèrica de kapton quadrada lligada pels 4 costats per evitar un primer mode de torsió, amb un imant de NdFeB, alineat i centrat gràcies a un segon imant situat a sota de la membrana.

La construcció i caracterització d'un joc de prototips preliminars, realitzat amb una microbobina d'Al no optimitzada fabricada amb unes màscares ja existents, ha permès validar el model.

A partir d'aquests resultats i mitjançant diferents simulacions del dispositiu s'ha realitzat un "roadmap" per a la seva optimització disminuint l'esmoreïment paràsit, per millorar-ne la ressonància, i augmentant la densitat d'espores i disminuint la seva resistència en sèrie, per augmentar la variació de flux.

La fabricació d'un altre joc de prototips realitzats amb unes bobines micromecanitzades de Cu, en les que s'han inclòs algunes de les optimitzacions, ha permès aconseguir un

dispositiu que genera una densitat de potència de $40\mu\text{W}/\text{cm}^3$. Els resultats obtinguts amb la seva caracterització, mitjançant diversos sistemes de mesura automàtics, es comparen amb els d'uns altres prototips que utilitzen els mateixos ressonadors però substituint la microbobina per una de fil de Cu convencional. Malgrat que amb la microbobina de Cu es genera una densitat de potència menor, permet la integració del dispositiu en tecnologia MEMS.

L'ús d'una membrana polimèrica implica l'aparició de fenòmens d'histeresi en augmentar l'amplitud d'excitació. Aquest comportament no lineal presenta com a avantatge una major amplitud de vibració de l'imant lligada a un augment de l'energia generada, malgrat implicar-ne una inestabilitat.

Els dispositius s'haurien d'encapsular al buit per evitar l'esmoreïment paràsit de l'aire i els problemes associats a l'absorció de la humitat, molt crítics quan les membranes utilitzades són polimèriques com en el cas del Kapton amb uns paràmetres mecànics molt sensibles a aquests canvis.

Els resultats de potència obtinguts experimentalment amb el prototip construït es comparen amb els de l'estat de l'art, normalitzant al volum actiu magnètic del generador i a l'acceleració. La densitat de potència normalitzada generada és de $6.4\mu\text{W}/\text{cm}^3\text{g}^2$, que es troba en el rang de potència esperada. No obstant, es preveu que l'optimització dels processos de la fotolitografia de resina gruixuda permetria un augment del gruix de les bobines fins al rang entre les 20 i $40\mu\text{m}$ que incrementaria la potència generada fins als centenars de μW i el voltatge de sortida fins als 800mV. Aquests nivells de tensió assolits serien compatibles amb els requeriments relacionats amb l'ús de circuits de rectificació estàndards per generar un senyal continu.

Malgrat la bona densitat de potència obtinguda amb aquest dispositiu, s'han observat efectes de no linealitats en la ressonància. El comportament metastable del ressonador implica la necessitat de treballar en condicions de freqüència d'excitació creixent, per maximitzar la potència generada. A més a més, a nivell de disseny del dispositiu, s'haurà de tenir en compte la dependència de la freqüència del pic en funció de l'amplitud d'excitació.

Per altra banda, la fabricació de les bobines ha presentat problemes de reproductibilitat. El fet de treballar amb resines gruixudes implica una alta probabilitat de defectes perquè s'està en condicions límit: bobines gruixudes i amb amplades i separacions entre pistes molt petites.

El procés additiu de fabricació de les bobines provoca que un sol defecte en la fotolitografia produeixi un tall en una pista amb un efecte destructiu per a tota la bobina. Com que es tracta d'una fotolitografia amb una relació d'aspecte propera a 1, la probabilitat de defectes és considerablement elevada, degut a les dificultats en il·luminar uniformement el fons. Una il·luminació incorrecte provocaria que, després del revelat, quedessin restes de resina no degradades en les pistes on no s'hi podrà dipositar el Cu. Una solució és trobar un equilibri entre el temps d'il·luminació i el de revelat per evitar restes de resines en les pistes i, a la vegada, no afectar la seva resolució lateral. A més a més, existeix un problema electroquímic per poder dipositar el Cu quan les parets laterals són profundes. Això és degut a que l'electròlit presenta una major dificultat per a reaccionar i s'augmenten les possibilitats de formació de bombolles. En el lloc on apareix una bombolla no s'hi diposita el Cu, fet que inutilitza tota la bobina.

Una forma de millorar-ho podria ser utilitzant un procés subtractiu. A l'electrodipòsit d'una capa de Cu se li realitzaria un gravat per alliberar les pistes de les bobines amb una màscara fotolitogràfica. D'aquesta manera, un defecte en el gravat només produiria el curtcircuit de dues espirals, enlloc d'un tall en la pista que seria destructiu. No obstant, un procés de gravat químic com l'emprat en la fabricació de les bobines d'alumini és un tipus d'atac isotròpic. Un atac amb la mateixa velocitat en totes direccions només es pot utilitzar en bobines primes, entre 1 i $2\mu\text{m}$, com la d'Al. En el cas de capes gruixudes, el sobreatac lateral seria massa important.

Una solució millor podria ser la utilització d'un procés d'ablació per làser. Es tracta d'un procés subtractiu, similar a l'anterior, però emprant un atac anisotròpic adequat per a

treballar amb gruixos de resina de 50 μ m. Malgrat poder resoldre les limitacions que presenta la fabricació de les microbobines, no s'ha pogut realitzar degut a què no és una tecnologia disponible en les nostres instal·lacions.

Altres millores a realitzar quant a l'optimització del ressonador serien:

- Disminuir les pèrdues mecàniques emprant nous materials, que no siguin ni polímers ni materials magnètics, com el Cu.
- Encapsular al buit
- Utilitzar noves geometries, com ara suspensions en forma de braços i forats en membranes, buscant afavorir un primer mode sense torsió, i sense que es vegi afectada la integritat física, fet que requeriria un estudi mecànic detallat dels modes de vibració lateral. A més, s'hauria de tenir en compte si l'existència de forats o membranes en forma de braç podria provocar canvis en el comportament elàstic de la membrana en el buit.
- Utilitzar tecnologies de fabricació d'imants amb capes primes. Això seria necessari per poder aconseguir una integració total. El problema seria que, al ser capes primes que no superen les 100 μ m, el volum magnètic es reduiria considerablement i la potència obtinguda seria de l'ordre dels nanowatts.

Finalment, es realitza una primera anàlisi i modelització dels efectes no lineals i de l'histèresi de les membranes polimèriques per optimitzar el ressonador mecànic. S'estudiarà la dependència de la no linealitat amb els paràmetres físics del ressonador, per a optimitzacions futures. S'hauria de trobar l'equació diferencial del moviment del ressonador de manera més "exacte", millorant la modelització de la forma de la membrana i tenint en compte els efectes de la longitud efectiva. L'objectiu consistiria en poder modificar la gràfica del comportament de ressonador per aprofitar les avantatges de l'elasticitat addicional en l'augment de la freqüència de ressonància i de l'amplitud, tot evitant els problemes d'instabilitat.